

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-451-460>

УДК 541.12

## Расчет параметров режущего инструмента для изготовления разрезных фторопластовых колец

Кандидаты техн. наук, доценты Г. А. Вершина<sup>1)</sup>, Л. Е. Реут<sup>1)</sup>, инж. К. Р. Сидоренко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** В работе рассматривается технологический процесс изготовления фторопластовых уплотнительных колец, заключающийся в принудительной подаче и протягивании полимерной ленточной заготовки между вращающимися роликами, пластическом изгибе ленты в зоне деформации на заданную кривизну путем закручивания на приводной ролик и последующей операции отрезания полосы после получения кольца требуемого диаметра. Данная технология имеет высокую производительность за счет автоматизации полного цикла изготовления разрезного кольца и непрерывности процесса, позволяет минимизировать отходы, снизить трудоемкость и энергоемкость производства. Наиболее сложным вопросом при разработке предложенной технологии является проектирование рабочего инструмента, его размеров и геометрии, а также силовых и кинематических параметров устройства, обеспечивающих получение фторопластовых колец требуемой точности. Сложность вопроса заключается в том, что фторопласт обладает целым рядом особенностей, проявляемых при деформировании, и его механическое поведение в условиях силового воздействия значительно отличается от поведения известных классических материалов. Однако в отличие от других полимеров фторопласт является высокоплотным материалом и имеет структуру с высокой степенью кристалличности, поэтому, как показывают исследования, его поведение под нагрузкой, а также механизм и последовательность протекания в нем деформаций во многом подобны поведению металлов, что позволяет использовать для фторопласта методы и подходы, принятые в механике твердых деформируемых тел. Согласно предложенной технологии, фторопластовая ленточная заготовка, протягиваемая между вращающимися роликами и подвергающаяся изгибу в зоне деформации, испытывает чистый изгиб с возникновением упругих и остаточных деформаций, из которых именно последние придают изделию необходимую форму и обеспечивают получение кольца требуемого диаметра. Для решения этой задачи необходимо выполнение соответствующего силового и геометрического расчетов процесса. Силовой расчет направлен на определение силовых параметров изгиба, создающих в деформируемом изделии максимально возможные необратимые деформации с минимально возможным упругим восстановлением (пружинением) после выхода из зоны деформации, а геометрический расчет направлен на выполнение силовых условий. На основе исследования напряженного состояния при гибке фторопластовой ленты с учетом различной жесткости фторопласта при растяжении и сжатии, а также кинематического расчета элементов рабочего узла установки определены диаметры формообразующего ролика, создающего необходимые усилия изгиба в зоне деформации, и обрезающего ролика-калибра, обеспечивающего получение кольца требуемого диаметра. Разработанные авторами расчетные методики достаточно точно согласуются с результатами экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** уплотнительные фторопластовые кольца, деформации при силовом воздействии, механическая модель фторопласта, изгиб фторопластовой ленты, разработка расчетной методики, силовой, геометрический и кинематический расчет рабочего узла установки

**Для цитирования:** Вершина, Г. А. Расчет параметров режущего инструмента для изготовления разрезных фторопластовых колец / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут, К. Р. Сидоренко // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 451–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-451-460>

## Calculation of Cutting Tool Parameters for Production of Split Fluoroplastic Rings

G. A. Vershina, L. E. Reut, K. R. Sidorenko

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper considers the technological process of manufacturing fluoroplastic sealing rings, consisting in forced feeding and pulling a polymer tape blank between rotating rollers, plastic bending of the tape in the deformation zone to a given curvature by twisting it on a drive roller and the subsequent operation of cutting off the strip after obtaining a ring of

**Адрес для переписки**  
Вершина Георгий Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, Минск, Республика Беларусь  
тел. +375 (17) 342-16-48  
gavershina@bntu.by

**Address for correspondence**  
Vershina Georgiy A.  
Belarusian National Technical University  
24, Ya. Kolas str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
тел. +375 (17) 342-16-48  
gavershina@bntu.by

the required diameter. This technology has high productivity due to the automation of the full cycle of manufacturing a split ring and the continuity of the process allowing to minimize waste, reduce the labor intensity and energy intensity of production. The most difficult issue in developing the proposed technology is the design of the working tool, its dimensions and geometry, as well as the power and kinematic parameters of the device that ensure the production of fluoroplastic rings of the required accuracy. The complexity of the issue lies in the fact that fluoroplastic has a number of features that manifest themselves during deformation, and its mechanical behavior under force exposure differs significantly from the behavior of known classical materials. However, unlike other polymers, fluoroplastic is a high-density material and has a structure with a high degree of crystallinity, therefore, as studies show, its behavior under load, as well as the mechanism and sequence of deformations in it, are in many ways similar to the behavior of metals, which allows to use methods and approaches adopted in the mechanics of solid deformable bodies for fluoroplastic. According to the proposed technology, a fluoroplastic tape blank, pulled between rotating rollers and subjected to bending in the deformation zone, experiences pure bending with the occurrence of elastic and residual deformations, of which it is the latter that give the product the necessary shape and ensure the production of a ring of the required diameter. To solve this problem, it is necessary to perform the corresponding force and geometric calculations of the process. Force calculation is aimed at determining the force parameters of bending that create the maximum possible irreversible deformations in the deformed product with the minimum possible elastic recovery (springing) after leaving the deformation zone, and the geometric calculation is aimed at fulfilling force conditions. Based on a study of the stress state during bending of fluoroplastic tape, taking into account the different rigidity of fluoroplastic under tension and compression, as well as the kinematic calculations of the elements of the working unit of the installation, the diameters of the forming roller that creates the necessary bending forces in the deformation zone and the cutting roller-caliber that ensure obtaining a ring of the required diameter are determined. The calculation methods developed by the authors are in fairly accurate agreement with the results of experimental studies.

**Keywords:** fluoroplastic sealing rings, deformations under force action, mechanical model of fluoroplastic, bending of fluoroplastic tape, development of calculation methods, force, geometric and kinematic calculation of the working unit of the installation

**For citation:** Vershina G. A., Reut L. E., Sidorenko K. R. (2024) Calculation of Cutting Tool Parameters for Production of Split Fluoroplastic Rings. *Science and Technique*. 23 (6), 451–460. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-451-460> (in Russian)

## Введение

В настоящее время полимерные материалы благодаря своим уникальным свойствам находят все более широкое применение в самых различных отраслях промышленности и народного хозяйства – в радиоэлектронике и приборостроении, в электротехнической, химической и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве и медицине, военной и космической технике. Но особенно высокую значимость они приобретают в машиностроительном производстве, где потребление полимеров становится уже соизмеримым с потреблением металлов. Целесообразность применения полимерных материалов в машиностроении определяется, прежде всего, возможностью удешевления продукции, а также улучшением важнейших технико-экономических параметров машин (масса, долговечность, надежность). В результате внедрения полимеров высвобождаются ресурсы металла, а благодаря уменьшению отходов при переработке существенно повышается коэффициент использования материалов, который в настоящее время, согласно статистике, в два раза превышает коэффициент использования металлов. Широкая востребованность полимерных материалов определяется их вы-

сокими эксплуатационными качествами в различных температурно-силовых условиях, прочностью, часто соизмеримой с прочностью сталей, долговечностью, технологичностью в обработке и переработке, а также возможностью получения их химическим путем с любыми заданными свойствами, варьируя свойства в широких пределах и создавая множество различных модификаций [1, 2].

Одно из достойных мест в ряду полимерных конструкционных материалов занимают фторопласт и композиции на его основе. В современном мире применение фторопласта происходит в самых различных областях, начиная от масштабных технических проектов, где этот уникальный полимер используется в качестве конструкционного материала для деталей машин и механизмов, и заканчивая его применением в бытовых изделиях для напыления посуды, при этом исследования открывают все новые возможности фторопласта и расширяют сферы его применения. Фторопласт является очень перспективным и востребованным материалом, и наибольшую значимость он приобретает в машиностроении для производства различных деталей машиностроительных механизмов – прокладок, уплотнителей, сальников, манжет, опор скольжения и др. [3]. Мяг-

кость и текучесть фторопласта увеличивает срок службы деталей и узлов механизмов, подвергающихся трению. Он является отличным антифрикционным материалом и обладает очень низким коэффициентом трения (порядка 0,04), сопоставимым при взаимодействии между металлом и фторопластовыми деталями с трением в подшипниках при наличии смазки. Широкое применение фторопласт имеет в качестве уплотнительного материала, предназначенного для эксплуатации в агрессивных средах, в гидравлических и пневматических системах, для герметизации подвижных элементов или конструкций под давлением. По герметичности фторопласт не уступает резине, а по долговечности значительно превосходит ее. Фторопластовые уплотнения в виде колец, фланцев, манжет широко используются в сантехнических устройствах, системах водоснабжения и отопления, в клапанах, насосах, компрессорах нефтепроводов и газопроводов, в топливных системах автомобилей и т.д. и являются одними из лучших уплотнителей, которые могут быть использованы в самых разнообразных конструкциях и отраслях.

Уплотнения из фторопласта в большинстве случаев изготавливаются методами механической обработки, и в настоящее время существует несколько технологий изготовления защитных фторопластовых колец, одна из которых заключается в протягивании полимерной ленточной заготовки между вращающимися роликами, пластическом изгибе и закручивании ленты на приводной ролик-калибр с последующим отрезанием полосы после получения кольца требуемого диаметра [4]. Данная технология позволяет существенно повысить производительность за счет автоматизации полного цикла изготовления разрезного кольца и непрерывности процесса, минимизировать отходы, снизить трудоемкость и энергоемкость производства.

Целью работы является разработка методики расчета инструментов рабочего узла установки для получения колец требуемого диаметра с учетом физико-механических свойств фторопласта.

Согласно технологии [4], процесс осуществляется на устройстве путем принуди-

тельной подачи ленточной заготовки между двумя роликами, один из которых выполняет роль формообразующего элемента, а другой является прижимным, и последующей операции отделения готового кольца отрезанием ленты с помощью отрезного механизма (рис. 1). Механизм подачи включает в себя ведущий 1 и ведомый 2 ролики, связанные с силовым приводом, задающим элементам вращательное движение во встречном направлении и обеспечивающим равную линейную скорость роликов в зоне контакта. Ролик 2 для лучшего сцепления и предотвращения проскальзывания выполнен с упругой поверхностью, обеспечивающей также прижатие ленты 4, подаваемой в зазор. Для придания заготовке формы кольца осуществляют ее прижим роликом 2 приложением постоянного усилия и протягивание ленты по окружной поверхности формообразующего ролика 1, являющегося оправкой, на которой происходят изгиб и формирование кольцевой формы. Направляющим движущейся ленты является прижим 5, который обеспечивает ее загибание и движение к отрезному устройству, состоящему из ведущего ролика 1 механизма подачи и ведомого ролика-калибра 3 с жестко закрепленным резцом на его торцевой поверхности.

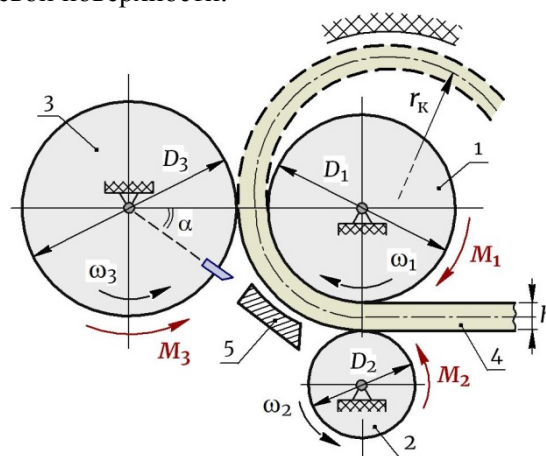


Рис. 1. Схема устройства для получения колец

Fig. 1. Diagram of the device for obtaining rings

При разработке данной технологии самым сложным вопросом является проектирование рабочего инструмента, его размеров и геометрии, а также кинематических параметров

устройства и механизма привода, обеспечивающих получение фторопластовых колец требуемой точности. При данной схеме деформирования имеет место чистый изгиб, при котором в заготовке возникают области растяжения и сжатия, и принимая для фторопласта механическую модель поведения как твердого деформируемого тела [5] с возможностью возникновения упругих и остаточных деформаций, при расчете инструмента и процесса в целом следует принимать во внимание возникновение пружинения после разгрузки и его влияние на конечные размеры готового кольца.

### Силовой и геометрический расчет

Фторопласт и его композиции имеют разные механические свойства при растяжении и сжатии, и хотя пределы текучести при этих деформациях у фторопласта примерно одинаковы ( $\sigma_{T(раст)} \approx \sigma_{T(сж)} = \sigma_T$ ), жесткость при сжатии значительно выше. При растяжении фторопласт является более упругим и обладает большей способностью к восстановлению размеров и формы, которое в основном происходит за счет высокоэластических деформаций и носит релаксационный характер. При сжатии фторопласт в большей степени является жестко-пластичным и, обладая свойством хладотекучести, способен при нагружении практически полностью деформироваться необратимо, без восстановления размеров даже с течением времени, хотя некоторая доля упругих деформаций возникает и при сжатии.

Как известно из теории изгиба, при достижении изгибающим моментом определенной величины первоначально текучесть начинается на краю сечения, а затем зона остаточных деформаций расширяется, смещаясь к нейтральному слою [6]. Но даже при самой большой силовой нагрузке здесь всегда сохраняется некоторая упругая область, где присутствуют только упругие деформации, стремящиеся «распрямить» изогнутую деталь после разгрузки, создавая эффект пружинения. Наличие упругого ядра в области нейтрального слоя было доказано в работах [7, 8], там же приведен расчет его ширины. Эта упругая зона лежит по обе стороны от нейтрального слоя, но

большая часть ее ширины расположена в области растяжения вследствие различия свойств фторопласта при растяжении и сжатии.

Напряженное состояние при изгибе в цилиндрической системе координат характеризуется тремя главными напряжениями: тангенциальным напряжением  $\sigma_\theta$ , действующим в окружном направлении; радиальным напряжением  $\sigma_\rho$ , действующим в радиальном направлении и возникающим вследствие нажатия продольных слоев заготовки друг на друга; аксиальным напряжением  $\sigma_z$ , действующим вдоль ширины заготовки (перпендикулярно чертежу). Как известно из теории листовой штамповки [9], указанные напряжения определяются путем совместного решения уравнения равновесия и условия пластичности и имеют знаки:  $\sigma_\theta$  в растянутой части заготовки растягивающие, в сжатой – сжимающие, а радиальные напряжения  $\sigma_\rho$  как в растянутой, так и в сжатой частях являются сжимающими (рис. 2):

– для области растяжения:

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \ln \frac{r_{нар}}{\rho}; \quad \sigma_\theta = \sigma_T \left( 1 - \ln \frac{r_{нар}}{\rho} \right); \quad (1)$$

– для области сжатия:

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \ln \frac{\rho}{r_{вн}}; \quad \sigma_\theta = -\sigma_T \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r_{вн}} \right), \quad (2)$$

где  $r_{нар}$  и  $r_{вн}$  – радиусы наружных и внутренних волокон изгибаемой детали;  $\rho$  – радиус произвольной элементарной площадки шириной  $dr$  (рис. 2).

При гибке полосы также возникают аксиальные напряжения  $\sigma_z$ , которые учитываются только при изгибе широкой полосы, а при изгибе узкой полосы (гибке на ребро) они бесконечно малы по сравнению с напряжением текучести, поэтому ими можно пренебречь и напряженное состояние принимать как плоское.

Анализ формул (1) и (2) показывает, что напряжения  $\sigma_\rho$  на краю сечения равны нулю и возрастают по мере удаления от поверхности в толщину заготовки. На некоторой поверхности с радиусом  $\rho_n$  напряжения  $\sigma_\rho$  для зон растяжения и сжатия становятся равными,

а окружные напряжения  $\sigma_\Theta$  меняют знак. Эту поверхность, отделяющую зону растяжения от зоны сжатия, называют нейтральной поверхностью напряжений, а значение радиуса этой поверхности  $\rho_n$ , приравняв  $\sigma_\rho$  для зон растяжения и сжатия при  $\rho = \rho_n$  в формулах (1) и (2), получают равным [10]

$$\rho_n = \sqrt{r_{\text{нар}} r_{\text{вн}}} \quad (3)$$

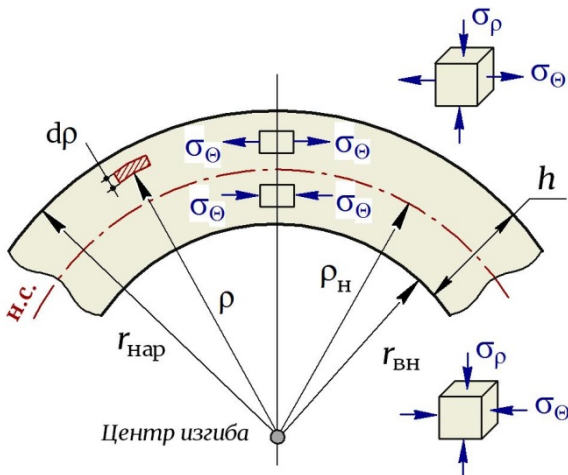


Рис. 2. Напряженное состояние при гнбе  
Fig. 2. Stress state during bending

Подставив значение  $\rho = \rho_n$  (3) в формулы (1) и (2), радиальные напряжения на нейтральной поверхности напряжений будут равны  $\sigma_\rho^{\text{max}} = -\sigma_T \ln \sqrt{1 + \frac{h}{r_{\text{вн}}}}$ , откуда видно, что при  $\frac{r_{\text{вн}}}{h} > 5$  напряжения  $\sigma_\rho^{\text{max}} < 0,1\sigma_T$ , поэтому влиянием  $\sigma_\rho$  на условия деформирования пренебрегают, рассматривая напряженное состояние как линейное, а нейтральный слой (нейтральную поверхность напряжений) считают совпадающим с срединной поверхностью заготовки, т.е.  $\rho_n = r_{\text{вн}} + 0,5h$  [10].

Принимая эти допущения, рассмотрим предельный случай (как желаемый), когда при изгибе ленты все сечение – и в области растяжения, и в области сжатия – полностью охвачено пластическими деформациями, а действующие здесь напряжения  $\sigma_\Theta$  постоянны и равны пределу текучести  $\sigma_T$ . Этот случай является гипотетическим и в реальности существовать не может, хотя в некоторых технологических рас-

четах, где бесконечно узкой упругой областью пренебрегают, он принимается как реальный и рассматривается для оценки несущей способности элементов и конструкции в целом.

Определим изгибающий момент, который создает максимально возможный необратимый изгиб ленточной заготовки с возникновением в ней остаточных деформаций, обеспечивающих требуемую форму готового кольца. Разбиваем сечение на зоны растяжения и сжатия, в каждой из них изгибающий момент определяем как сумму моментов тангенциальных сил  $\sigma_\Theta$  относительно центра изгиба (рис. 2), учитывая, что в указанных зонах эти силы имеют противоположное направление, и принимая, что  $\sigma_{\Theta(\text{раст})}$  и  $\sigma_{\Theta(\text{сж})}$  постоянны по высоте сечения и равны пределу текучести  $\sigma_T$ , определяем в сечении полный изгибающий момент  $M_{\text{полн}}$ :

$$\begin{aligned} M_{\text{раст}} &= \int_{\rho_n}^{r_{\text{нар}}} b \sigma_{\Theta(\text{раст})} \rho d\rho = \frac{b \sigma_T}{2} (r_{\text{нар}}^2 - \rho_n^2) = \\ &= \frac{b \sigma_T}{2} (r_{\text{нар}} - \rho_n)(r_{\text{нар}} + \rho_n) = \\ &= \frac{b \sigma_T}{2} \cdot \frac{h}{2} (r_{\text{нар}} + \rho_n) = \frac{bh \sigma_T}{4} (r_{\text{нар}} + \rho_n); \\ M_{\text{сж}} &= - \int_{r_{\text{вн}}}^{\rho_n} b \sigma_{\Theta(\text{сж})} \rho d\rho = - \frac{b \sigma_T}{2} (\rho_n^2 - r_{\text{вн}}^2) = \\ &= - \frac{b \sigma_T}{2} (\rho_n - r_{\text{вн}})(\rho_n + r_{\text{вн}}) = \\ &= - \frac{b \sigma_T}{2} \cdot \frac{h}{2} (\rho_n + r_{\text{вн}}) = - \frac{bh \sigma_T}{4} (\rho_n + r_{\text{вн}}); \\ M_{\text{полн}} &= M_{\text{раст}} + M_{\text{сж}} = \frac{bh \sigma_T}{4} (r_{\text{нар}} + \rho_n) - \\ &\quad - \frac{bh \sigma_T}{4} (\rho_n + r_{\text{вн}}) = \frac{bh^2 \sigma_T}{4}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r_{\text{нар}}$  и  $r_{\text{вн}}$  – радиусы кривизны наружных и внутренних волокон;  $\rho_n$  – радиус кривизны нейтрального слоя;  $b$  и  $h$  – ширина и высота сечения.

Из формулы (4) видно, что момент, необходимый для пластического изгиба, не изменяется в процессе деформирования по мере увеличения кривизны заготовки, начиная от значений, при которых упругая зона в области

нейтрального слоя пренебрежительно мала. Этот предельный момент не зависит от нагрузки, а определяется размерами сечения и является свойством материала.

Однако согласно закону наличия упругой деформации при пластическом формоизменении всякая пластическая деформация, пока элемент находится под нагрузкой, обязательно сопровождается упругой деформацией, поэтому полная кривизна изогнутой полосы определяется наличием этих составляющих и равна:

$$\frac{1}{\rho_{\text{полн}}} = \frac{1}{\rho_{\text{упр}}} + \frac{1}{\rho_{\text{ост}}}, \quad (5)$$

где согласно закону разгрузки и с учетом того, что фторопласт является разномодульным материалом, у которого  $E_{\text{раст}} \neq E_{\text{сж}}$ , упругая составляющая кривизны, созданная моментом  $M_{\text{полн}}$  (4), определяется как [8]

$$\frac{1}{\rho_{\text{упр}}} = \frac{2M_{\text{полн}}}{(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I}, \quad (6)$$

где  $I = bh^3/12$  – момент инерции сечения относительно нейтральной оси.

После снятия нагрузки упругие деформации исчезают. Волокна, находящиеся в зоне тангенциального растяжения, укорачиваются, а в зоне сжатия – удлиняются. Разные знаки напряжений и деформаций по толщине заготовки приводят при разгрузке к тому, что сечения, перпендикулярные к срединной поверхности, поворачиваются, изменяя угловые размеры и кривизну нейтрального слоя. Это явление называется пружинением, и в результате остаточный радиус кривизны  $\rho_{\text{ост}}$  на основании значений (5) и (6) с учетом момента (4) получается равным

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_{\text{ост}}} &= \frac{1}{\rho_{\text{полн}}} - \frac{1}{\rho_{\text{упр}}} = \frac{1}{\rho_{\text{полн}}} - \frac{2M_{\text{полн}}}{(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I} = \\ &= \frac{1}{\rho_{\text{полн}}} - \frac{bh^2 \sigma_{\text{т}}}{2(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I}, \end{aligned}$$

откуда 
$$\rho_{\text{ост}} = \frac{\rho_{\text{полн}}}{1 - \frac{\rho_{\text{полн}} bh^2 \sigma_{\text{т}}}{2(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I}}. \quad (7)$$

Принимая для данной схемы нагружения (рис. 1) полный радиус кривизны, обуслов-

ленный геометрией инструмента, как  $\rho_{\text{полн}} = R_1 + h/2 = (D_1 + h)/2$ , где  $D_1$  – диаметр ведущего ролика 1, а значение  $\rho_{\text{ост}} = d_{\text{к}}/2$ , где  $d_{\text{к}}$  – диаметр готового кольца, выражение (7) может быть приведено к виду

$$\frac{d_{\text{к}}}{2} = \frac{(D_1 + h)/2}{1 - \frac{bh^2 \sigma_{\text{т}} (D_1 + h)/2}{2(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I}},$$

откуда после несложных преобразований, учитывая значение  $I = bh^3/12$ , можно определить диаметр формообразующего ролика 1, на который осуществляется изгиб ленты и который после разгрузки должен обеспечить получение готового кольца требуемого диаметра:

$$D_1 = \frac{1}{\frac{1}{d_{\text{к}}} + \frac{3\sigma_{\text{т}}}{h(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})}} - h. \quad (8)$$

Изгиб фторопластовой ленты осуществляется путем ее наматывания на оправку-ролик 1 на участке 1–2, равном четверти круга (рис. 3), где лента подвергается силовому воздействию, приводящему к возникновению в ней упругих и пластических деформаций. Далее при повороте ролика лента высвобождается и вследствие упругого пружинения происходит уменьшение кривизны полученной части изделия. Исходя из условия, что при разгрузке длина нейтрального слоя не изменяется, определим остаточный угол  $\Phi_{\text{ост}}$  для части кольца, подвергшейся изгибу:

$$\rho_{\text{полн}} \Phi_0 = \rho_{\text{ост}} \Phi_{\text{ост}}, \quad (9)$$

откуда с учетом значений (7),  $\rho_{\text{полн}} = (D_1 + h)/2$  и  $I = bh^3/12$ , получаем:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{ост}} &= \frac{\rho_{\text{полн}}}{\rho_{\text{ост}}} \Phi_0 = \frac{\rho_{\text{полн}} \Phi_0}{\rho_{\text{полн}} / \left[ 1 - \frac{\rho_{\text{полн}} bh^2 \sigma_{\text{т}}}{2(E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}})I} \right]} = \\ &= \left[ 1 - \frac{c(D_1 + h)}{h} \right] \cdot \Phi_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где 
$$c = \frac{3\sigma_{\text{т}}}{E_{\text{раст}} + E_{\text{сж}}} - \quad (11)$$

механический коэффициент;  $\Phi_0 = \pi/2$  – угол изгиба на ролик 1.

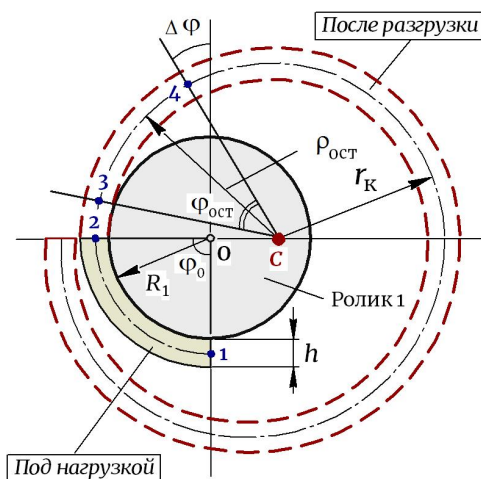


Рис. 3. Зона деформации ленточной заготовки

Fig. 3. Deformation zone of the strip blank

Тогда угол пружинения с учетом значения угла (10) определится как

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_{ост} = \frac{c(D_1 + h)}{h} \cdot \frac{\pi}{2}. \quad (12)$$

Формулу (12) можно представить в виде

$$\Delta\varphi = c\pi \left( \frac{R_1}{h} + 0,5 \right),$$

откуда, согласно значению коэффициента (11), видно, что угол пружинения зависит от отношения  $\frac{\sigma_t}{E_{раст} + E_{сж}}$ , а также от отношения радиуса гибки к толщине ленты

$\frac{R_1}{h}$ . Чем выше эти величины, тем бóльшим будет угол пружинения. Величину пружинения необходимо учитывать при разработке технологии и проектировании формообразующего инструмента.

Кроме того, при выполнении проекторочных расчетов следует также учитывать особенности деформационного поведения фторопласта, в котором помимо классической упругой (гуковской) деформации возникает высокоэластическая деформация, которая тоже является обратимой, но имеет релаксационный характер [1, 5] и при разгрузке исчезает не мгновенно, а со временем. Эта деформация имеет величину, значительно больше гуковской, а значит, при ее исчезновении вследствие высокоэластического пружинения длина ленты за пределами зоны де-

формации может существенно уменьшиться, в результате чего точки наружной поверхности не опишут полный круг и не обеспечат получения полного замкнутого кольца.

При выходе из зоны нагружения лента не сразу принимает радиус готового кольца. Освободившаяся от нагрузки, но еще не полностью освободившаяся от упругих деформаций, она выходит на конечный диаметр постепенно, определяя положение центра кольца «С» относительно центра ролика 1. В результате на участке полосы между точками 2 и 3 образуется область неустановившейся деформации (рис. 3), в которой кривизна движущейся ленты изменяется, а изменяющиеся радиус и угол, определяющие длину дуги, связаны между собой функционально ( $\rho = f(\varphi)$ ). Так как характер изменения кривизны ленты на участке 2–3 неизвестен и математический вид этой функции является сложной задачей, определить точную длину дуги на этом участке не представляется возможным. Однако учитывая, что фторопласт при растяжении проявляет высокие упругие свойства и имеет высокую степень пружинения после разгрузки, достаточно быстро сбрасывая упругие составляющие полной деформации, длина зоны неустановившейся деформации 2–3 весьма незначительна и ее в расчетах можно не рассматривать, а отсчет формирующегося кольца производить от точки 3, принимая ее за начальную точку изделия, где радиус кольца  $\rho_{ост}$  принимает конечное значение. Далее, за пределами этой точки кривизна ленты не изменяется, и она формируется в кольцо постоянного диаметра. Но поскольку при изгибе и в зоне нагружения (участок 1–2), и в зоне разгрузки (участок 3–4) длина нейтрального слоя не изменяется, увеличение радиуса приводит к уменьшению угла, который и определяется на основании равенства (9) и полученной из него формулы (10).

Определим геометрию и скорость вращения ролика-калибра 3. Как только лента выходит из зоны деформации (рис. 4), радиус ее кривизны увеличивается, и при дальнейшем продвижении она приобретает форму кольца конечного диаметра  $d_k$ .

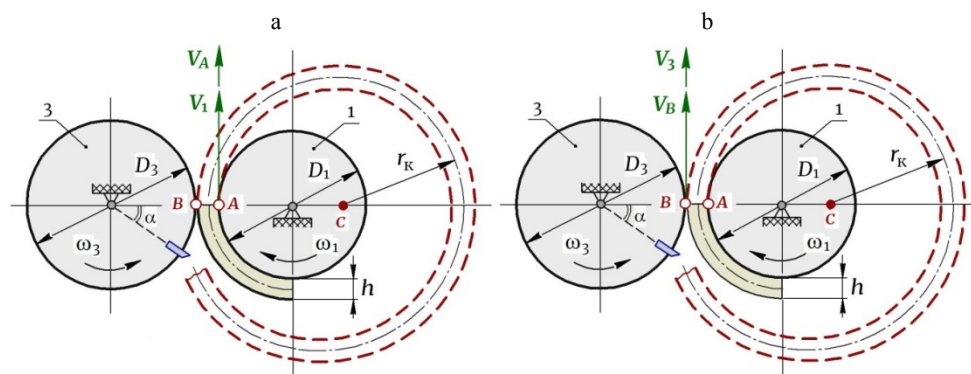


Рис. 4. Кинематический и геометрический расчет ролика-калибра 3  
 Fig. 4. Kinematic and geometric calculation of the caliber roller 3

Рассмотрим фрикционную пару «ролик 1 – лента» (рис. 4а), в которой ролик 1 является ведущим элементом, а лента – ведомым. Во фрикционных передачах в результате упругого деформирования соприкасающихся деталей линия контакта превращается в контактную площадку, в которой только в точках, расположенных на одной из линий этой площадки, наблюдается равенство скоростей, а в других точках скорости неодинаковы, вследствие чего возникает явление проскальзывания. По этой причине скорость ведомого элемента всегда меньше скорости ведущего и для рассматриваемой фрикционной пары равна:

$$V_A < V_1 \rightarrow V_A = V_1(1 - \xi_1), \quad (13)$$

где  $V_1$  – окружная скорость ведущего ролика 1;  $V_A$  – окружная скорость точки, «А», лежащей на внутренней поверхности кольца;  $\xi_1$  коэффициент скольжения, принимаемый равным  $\xi_1 = 0,002-0,050$  в зависимости от материала фрикционной пары.

Рассмотрим фрикционную пару «лента – ролик 3» (рис. 4б), в которой ведущим элементом является лента, а ведомым – ролик 3. Вследствие проскальзывания здесь также скорость ведомого элемента меньше скорости ведущего и для рассматриваемой фрикционной пары равна

$$V_3 < V_B \rightarrow V_3 = V_B(1 - \xi_2), \quad (14)$$

где  $V_3$  – окружная скорость ведущего ролика-калибра 3;  $V_B$  – окружная скорость точки «В»,

лежащей на наружной поверхности кольца;  $\xi_2$  – коэффициент скольжения для данной фрикционной пары.

Значения окружных скоростей точек «А» (13) и «В» (14) фторопластового кольца указаны для зоны деформации (рис. 4), когда лента находится между роликами 1 и 3 и где внутренний и наружный радиусы кольца соответственно имеют значения:  $r_A = D_1/2$  и  $r_B = D_1/2 + h$ . Но окружная скорость точек элементов фрикционной пары изменяется пропорционально расстоянию этих точек от центра вращения, поэтому в зоне деформации изменение окружной скорости по толщине ленты равно

$$V_B = V_A \frac{r_B}{r_A} = V_A \frac{D_1/2 + h}{D_1/2} = V_A \frac{D_1 + 2h}{D_1}. \quad (15)$$

Подставляя в выражение (15) значения скоростей точек ленты на внутренней (13) и наружной (14) поверхностях кольца, определяем окружную скорость для обрезающего ролика 3

$$V_3 = V_1 \frac{D_1 + 2h}{D_1} (1 - \xi_1)(1 - \xi_2), \quad (16)$$

где в случае, если  $\xi_1 = \xi_2 = \xi$ , скорость (16) может быть определена как

$$V_3 = V_1 \frac{D_1 + 2h}{D_1} (1 - \xi)^2. \quad (17)$$

Так как скорости роликов 1 и 3 соответственно равны:



$$V_1 = \omega_1 \frac{D_1}{2}; \quad V_3 = \omega_3 \frac{D_3}{2},$$

подставляем эти значения в выражение (17) и после преобразования получаем расчетное значение диаметра ролика-калибра 3

$$D_3 = (D_1 + 2h) \cdot \frac{\omega_1}{\omega_3} (1 - \xi)^2. \quad (18)$$

Движение ленты является равномерным и точки ее наружной поверхности имеют одинаковую окружную скорость, задаваемую роликом 1 и равную  $V_B$  в зоне деформации (рис. 4b), а значит, исходя из соотношения между линейной и угловой скоростями  $V = \omega R$ , следует, что поскольку при выходе из зоны деформации радиус кривизны ленты увеличивается, значит, при сохранившейся окружной скорости угловая скорость точек должна уменьшиться.

В зоне деформации движение ленты происходит с угловой скоростью, равной угловой скорости  $\omega_1$  ведущего ролика 1, определяемой как

$$\omega_1 = \frac{\varphi_0}{t}, \quad (19)$$

где  $\varphi_0 = \pi/2$  – угол гибки на ролике 1.

При выходе из зоны деформации точки ленты после исчезновения упругих деформаций за это же время получают перемещение на угол  $\varphi_{ост}$  (10) и имеют угловую скорость

$$\omega_{ост} = \frac{\varphi_{ост}}{t}. \quad (20)$$

Исходя из этого на основании значений (19) и (20) получаем соотношение

$$\frac{\varphi_0}{\omega_1} = \frac{\varphi_{ост}}{\omega_{ост}}, \quad (21)$$

откуда с учетом формулы  $\varphi_{ост}$  (10) определяем угловую скорость точек ленты за пределами зоны деформации:

$$\omega_{ост} = \omega_1 \left( 1 - c \frac{D_1 + h}{h} \right). \quad (22)$$

Формула (22) подтверждает, что поскольку величина в скобках меньше 1, угловая скорость точек ленты за пределами деформации меньше скорости в зоне изгиба.

Время, за которое происходит угловое перемещение точек на угол  $\varphi_{ост}$ , на основании (20) равно  $t$ , но чтобы точки наружной поверхности ленты прошли полный круг, равный  $2\pi$ , для этого необходимо время в  $(2\pi/\varphi_{ост})$  раз большее и с учетом значения (10) и  $\varphi_0 = \pi/2$  равно:

$$t_{полн} = \frac{4t}{1 - c \frac{D_1 + h}{h}}. \quad (23)$$

За это же время точки поверхности ролика-калибра 3 также должны сделать полный оборот и повернуться на угол  $2\pi$ , исходя из чего угловая скорость ролика с учетом значений (19) и (23) может быть определена как

$$\begin{aligned} \omega_3 &= \frac{2\pi}{t_{полн}} = \frac{2\pi \left( 1 - c \frac{D_1 + h}{h} \right)}{4t} = \\ &= \frac{\pi/2}{t} \left( 1 - c \frac{D_1 + h}{h} \right) = \omega_1 \left( 1 - c \frac{D_1 + h}{h} \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Сравнение значений (22) и (24) показывает, что угловые скорости точек наружной поверхности фторопластовой полосы и точек ролика-калибра 3 одинаковы, а значит, при прохождении полного круга, что соответствует изготовлению одного кольца, диаметр ролика 3 должен быть равен наружному диаметру готового кольца:  $D_3 = d_{нар}$ . Однако скорость вращения ролика-калибра 3, согласно значению (14), определяется скоростью движения деформируемой ленты, поэтому если в формулу (18) подставить значение (24), то с учетом диаметра  $D_1$  (8) и величины  $d_k = d_{нар} - h$  после преобразования получаем

$$\begin{aligned} D_3 &= \frac{D_1 + 2h}{1 - c \frac{D_1 + h}{h}} (1 - \xi)^2 = \\ &= [d_{нар} + c(d_{нар} - h)] (1 - \xi)^2, \end{aligned} \quad (25)$$

откуда видно, что при отсутствии проскальзывания ( $\xi = 0$ )  $D_3 > d_{нар}$ . Такое допущение является правомерным, поскольку для фрикционной пары фторопласт-ролик 3, учитывая, что последний имеет подготовленную рифленую поверхность и свободно вращается на своей оси,  $\xi = 0,005$ .

Формула (25) для проектирования диаметра режущего ролика-калибра достаточно точно согласуется с результатами экспериментальных исследований, проведенных для фторопластовых колец с сечением  $b \times h = 6 \times 1,5$  мм из фторопласта модификации Ф4К20, имеющего, согласно литературе, механические свойства:  $E_{\text{раст}} = 1500$  МПа,  $E_{\text{сж}} = 805$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 11,8$  МПа, для которых механический коэффициент (11) соответственно равен с  $\approx 0,015$ .

Результаты исследований и расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Кольцо $d_{\text{нар}}$ , мм	40	50	65	70
Диаметр ролика-калибра $D_3$ , мм (экспериментальное значение)	40,4	50,8	66,2	71,4
Диаметр ролика-калибра $D_3$ , мм (расчетное значение)	40,6	50,7	65,9	71,0

### ВЫВОД

Предложенная методика расчета кинематических и геометрических параметров инструментов рабочего узла установки для получения колец из фторопластовой ленточной заготовки по технологии [4] является вполне достоверной, достаточно точно согласующейся с результатами экспериментальных исследований и может быть использована при разработке технологического процесса и проектировании элементов оборудования для изготовления фторопластовых уплотнительных колец требуемой точности в широком диапазоне размеров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каргин, В. А. Структура и механические свойства полимеров / В. А. Каргин. М.: Наука, 1979. 449 с.
2. Тугов, И. И. Химия и физика полимеров / И. И. Тугов, Г. И. Кострыкина. М.: Химия, 2009. 432 с.
3. Горяинова, А. В. Фторопласты в машиностроении / А. В. Горяинова, Г. К. Божков, М. С. Тихонова. М.: Машиностроение, 1971. 232 с.
4. Вершина, Г. А. Способ изготовления разрезного кольца из полимерного материала и устройство для его осуществления: пат. ВУ 14191 / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. Оубл. 30.04.2011.
5. Вершина, Г. А. Анализ деформационного поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Весці НАН Беларусі. Сер. физ.-техн. наук. 2016. № 4. С. 23–30.
6. Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян [и др.]. М.: МГСУ, 1995. 568 с.

7. Вершина, Г. А. Упругопластический изгиб фторопластовой ленты при сворачивании в кольцо / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Весці НАН Беларусі. Сер. физ.-техн. наук. 2017. № 2. С. 40–48.
8. Вершина, Г. А. Влияние упругого ядра на размеры кольцевого изделия при изгибе фторопластовой ленты / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. С. 21–31. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-21-31>.
9. Лысов, М. Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. Н. Лысов. М.: Машиностроение, 1988. 236 с.
10. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 422 с.

Поступила 14.08.2024

Подписана в печать 15.10.2024

Опубликована онлайн 29.11.2024

### REFERENCES

1. Kargin V. A. (1979) *Structure and Mechanical Properties of Polymers*. Moscow, Nauka Publ. 449 (in Russian).
2. Tugov I. I., Kostrykina G. I. (2009) *Chemistry and Physics of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ. 432 (in Russian).
3. Goryainova A. V., Bozhkov G. K., Tikhonova M. S. (1971) *Fluoroplastics in Mechanical Engineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 232 (in Russian).
4. Vershina G. A., Pilatov A. Yu. (2011) *Way of Manufacturing a Cutting Ring from a Polymeric Material and the Device for its Realization*. Patent of the Republic of Belarus no. BY 14191 (in Russian).
5. Vershina G. A., Reut L. E. (2016) The Analysis of Deformation Behaviour of Fluoroplastic-4 in the Conditions of Power Influence. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (4), 23–30 (in Russian).
6. Vardanyan G. S., Andreev V. I., Atarov N. M., Gorshkov A. A. (1995) *Strength of Materials with the Basics of the theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Moscow University of Civil Engineering. 568 (in Russian).
7. Vershina G. A., Reut L. E. (2017) An Elasto-Plastic Bend of a Ftoroplastic Tape when Turning in a Ring. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 18 (2), 40–48 (in Russian).
8. Vershina G. A., Reut L. E. (2019) Influence of Elastic Core on Size of Ring Product under Bending of Fluoroplastic Band. *Nauka I Tennika = Science & Technique*, 18 (1), 21–31 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-21-31>.
9. Lysov M. N. (1988) *Theory and Calculation of Manufacturing Processes of Parts by Bending Methods*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 236 (in Russian).
10. Storozhev M. V., Popov E. A. (1977) *Theory of Metal Forming*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 422 (in Russian).

Received: 14.08.2024

Accepted: 15.10.2024

Published online: 29.11.2024